

UNIFORMIDADES DE RIEGO BAJO DIFERENTES CONDICIONES SOCIO-ECONÓMICAS: EVALUACIÓN DE PÍVOTS EN ARAGÓN (ESPAÑA) Y UTAH (EEUU)

Lecina, S.^{1,2}, Hill, R.W.³, Barker, J.B.⁴

¹ Investigador, Unidad de Suelos y Riegos (asociada a la EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA), Gobierno de Aragón. Avd. Montañana 930, 50059 Zaragoza, España. sergio.lecina@cita-aragon.es

² Visiting Post-doctoral Scholar, Department of Civil and Environmental Engineering. Utah State University. 4110 Old Main Hill. Logan, UT 84322 EEUU.

³ Professor Emeritus, Department of Civil and Environmental Engineering. Utah State University. 4110 Old Main Hill. Logan, UT 84322 EEUU.

⁴ Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering. Utah State University. 4110 Old Main Hill. Logan, UT 84322 EEUU.

Resumen

Este trabajo analiza la influencia de las condiciones socio-económicas en la calidad del riego. Su principal objetivo es generar información útil para apoyar la toma de decisiones de agricultores, comunidades de regantes, y administraciones públicas en la gestión del agua. Para este fin se evaluaron 34 pívots en Aragón (España) y Utah (EEUU). La agricultura de Utah presenta una menor capacidad productiva que la de Aragón, y la producción agraria es una actividad secundaria respecto a la ganadería extensiva en la mayoría de las explotaciones de este Estado. En Aragón, las explotaciones se dedican principalmente a la agricultura. Estas características pueden producir un sesgo en la toma de decisiones de los agricultores sobre las inversión, operación y mantenimiento de sus sistemas de riego. Este sesgo podría ser la causa subyacente de la menor uniformidad de riego obtenida en las evaluaciones realizadas en Utah. El coeficiente de uniformidad (CU) medio fue del 80%, mientras que en Aragón alcanzó el 90%. La diferencia entre el CU actual y potencial (90%) supone una reducción del -18% (66 € ha⁻¹, 89 US\$ ha⁻¹) de la productividad neta de la superficie en Utah. Las medidas necesarias para evitar estas pérdidas tendrían un coste inferior a 15 € ha⁻¹ (20 US\$ ha⁻¹). Estudios basados en un enfoque multidisciplinar son necesarios para cuantificar estas diferencias, y entender sus causas, a fin de evitar pérdidas económicas.

Abstract

This paper analyzes the influence of the socio-economic context in the irrigation performance. Its main objective is to provide useful information addressed to support the decisions of farmers, water user associations and policy-makers. For this aim, 34 center-pivots were evaluated in Aragon (Spain) and Utah (USA). Utah presents a lower agricultural production potential than Aragon, and crop production is a secondary activity with respect to extensive livestock in most farms. In Aragon, farms are mainly devoted to agriculture. These features may bias farmers' decisions about investment, operation and maintenance of their irrigation systems. This bias may be the underlying reason of the lower irrigation uniformity obtained in Utah. Coefficients of uniformity (CU) averaged 90% in Aragon and 80% in Utah. The gap between the actual and potential (90%) CU involves a net land productivity reduction of -18% (66 € ha⁻¹, 89 US\$ ha⁻¹) in Utah. Measures aimed at closing this gap would cost less than 15 € ha⁻¹ (20 US\$ ha⁻¹). Multidisciplinary approaches are required to quantify these gaps and to understand their causes in order to bridge them in a cost-effective manner.

1- Introducción y Objetivos

Los sistemas de riego presurizado bien diseñados son capaces de proporcionar un alto aprovechamiento del agua y la energía en casi cualquier medio agrario. Las modernas tecnologías de aspersión y goteo ofrecen una amplia variedad de soluciones para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos de forma eficiente en condiciones edáficas, climáticas y agronómicas diferentes.

Los pivots son uno de estos sistemas de riego presurizado capaces de alcanzar elevadas uniformidades en la aplicación de agua. El coeficiente de uniformidad (CU) potencial de estos sistemas es del 90% (Cuenca, 1989). Sin embargo, la uniformidad real no siempre alcanza este potencial. Las evaluaciones de riego realizadas en diferentes zonas muestran resultados variables. Tarjuelo et al. (1999) llevaron a cabo 58 evaluaciones en el sureste de España obteniendo un CU medio del 87% (máximo 93%, mínimo 72%) para una velocidad de viento media de $2,2 \text{ m s}^{-1}$. Almasraf et al. (2011) obtuvieron resultados similares en 10 evaluaciones realizadas en Michigan (EEUU). La CU fue del 84%, en promedio (máximo 90%, mínimo 74%), para vientos inferiores a $4,9 \text{ m s}^{-1}$. Sin embargo, la CU media fue de tan solo el 75% (máximo 90%, mínimo 59%) en 10 evaluaciones realizadas por Dechmi et al. (2003a) en el noreste de España, con una velocidad media del viento de $1,9 \text{ m s}^{-1}$. En Missouri (EEUU), Henggeler y Vories (2009) obtuvieron una CU media del 80% (máximo 92%, mínimo 49%) en 60 evaluaciones (datos de viento no disponibles).

Estos estudios discuten sobre la influencia de diferentes variables técnicas en la uniformidad obtenida. Tales análisis son difíciles porque no todas las variables técnicas son estudiadas en las evaluaciones de riego. No obstante, la cuestión subyacente es por qué los factores técnicos no son adecuadamente gestionados a fin de alcanzar uniformidades de riego en torno a su valor potencial en todos los casos (Venot et al., 2014).

Teóricamente, las razones económicas son las que determinan las decisiones de los agricultores en la adopción de tecnologías de riego, en la gestión del agua, y en el mantenimiento de los equipos. Estas decisiones estarían orientadas a maximizar sus ingresos (Luquet et al., 2005). En este sentido, la uniformidad de riego tiene una influencia fundamental en los costes de inversión y operación de los pivots, y por tanto, en el beneficio obtenido por los agricultores (Montero et al., 2013). Sin embargo, factores sociales tales como la educación, el estatus social, la organización en el uso agua, o el contexto cultural, entre otros, también tienen una importancia relevante en estas decisiones (Leeuwis y Van den Ban, 2004). Por estos motivos, el contexto socio-económico debe también ser tenido en cuenta, junto con los factores técnicos, para la adecuada comprensión de las causas que afectan a la calidad del riego (Tanji y Keyes, 2002).

Este trabajo analiza si diferentes contextos socio-económicos en zonas agrícolas suponen diferentes uniformidades de riego para el mismo tipo de sistema de riego. Para este fin, 34 pivots fueron evaluados en Aragón (España) y Utah (EEUU). Estas zonas presentan un potencial agrícola y un contexto socio-económico diferente. Como consecuencia de ello, las explotaciones presentan diferentes características y orientaciones productivas.

El objetivo de este trabajo es generar información útil para apoyar la toma de decisiones de agricultores, comunidades de regantes y administraciones públicas en la gestión del agua. La identificación de forma genérica de necesidades potenciales de tecnología y servicios de estos agentes, constituye un objetivo secundario de este estudio.

2- Materiales y Métodos

Este trabajo se presenta en tres fases. En la primera fase se caracteriza el contexto socio-económico de las zonas donde se localizan las áreas de estudio. Posteriormente se analizan los resultados de las evaluaciones de riego. Finalmente, se estudia la influencia de la uniformidad de riego en el uso del agua y la energía, la producción agrícola, y la productividad económica.

La caracterización de las dos zonas consistió en la descripción general de las condiciones climáticas y del sector agrario en los regadíos de Aragón y Utah. También se incluyó un análisis de las condiciones del uso del agua, y de las productividades económicas netas de la superficie regada (PS_n) en las áreas de estudio. La PS_n se calculó como el cociente entre el margen neto y la superficie regada. El margen neto se determinó por diferencia entre los ingresos brutos y la suma de los costes directos y las amortizaciones. Los datos necesarios se obtuvieron de estadísticas oficiales y de bibliografía, así como de encuestas entre los agricultores. El tipo de cambio medio entre el euro y el dólar de EEUU durante los últimos cinco años ($1.35 \text{ US\$ } \text{€}^{-1}$) se utilizó para determinar la equivalencia entre monedas (ECB, 2014).

Un total de 34 evaluaciones de pivots se realizaron entre 2008 y 2010. En Aragón, 17 evaluaciones se llevaron a cabo en las zonas regables del Canal del Cinca y del río Gállego. En Utah, otras 17 evaluaciones se realizaron en los condados de Beaver y Box Elder (Figura 1). La velocidad media del viento durante las evaluaciones fue menor de 4.2 m s^{-1} en todos los casos (Tabla 1), de forma que se pudieran comparar los CU obtenidos (Faci y Bercero, 1991). Las evaluaciones se efectuaron sobre alfalfa, maíz en estados vegetativos iniciales o suelo desnudo en Aragón, y sobre alfalfa en Utah.

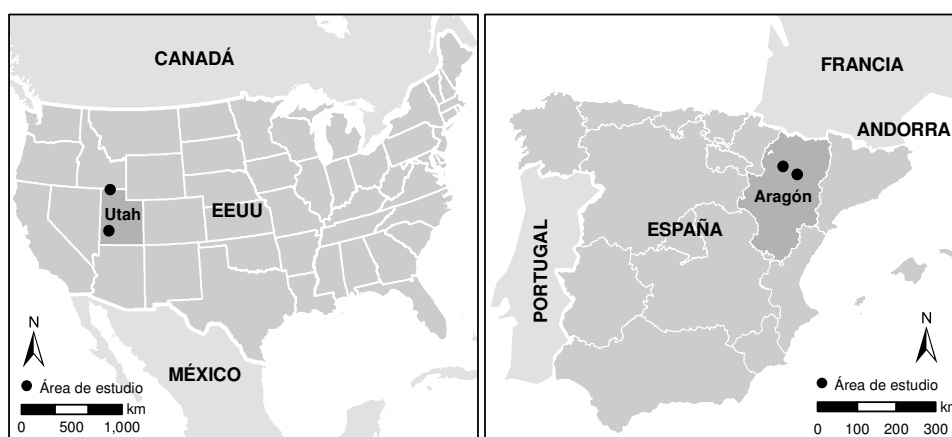


Figura 1. Localización de las áreas de estudio en Aragón (España) y Utah (EEUU)

Las evaluaciones siguieron las directrices metodológicas propuestas por Merriam y Keller (1978) y la ASABE (2007). Una serie de contenedores para recoger el agua de riego fueron dispuestos cada 6.0 m a lo largo de una línea radial con el fin de determinar la uniformidad de riego general. No se pretendió identificar deficiencias en aspersores puntuales (Rogers et al., 2009). El diámetro de apertura de los contenedores era de 0,143 m. El volumen de agua recogido fue medido mediante probetas. La dosis de agua obtenida en cada contenedor fue ponderada en función del área regada que representaba (Faci y Bercero, 1990), y utilizada para estimar el CU según la ecuación propuesta por Heerman y Hein (1968):

$$CU = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(w_i \left| d_i - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right| \right)}{\sum_{i=1}^n (d_i w_i)} \right] 100 \quad [1]$$

donde d es la dosis de agua recogida en el contenedor i , w es el factor de ponderación, y n es el número total de contenedores.

Las condiciones meteorológicas durante las evaluaciones se obtuvieron de las estaciones agrometeorológicas más cercanas del Servicio de Información Agrometeorológica para el Regadío en Aragón, y de la *Utah State University Cooperative Extension* en Utah. Los manómetros existentes a la entrada de los pivots fueron utilizados para medir las presiones disponibles. Los caudales de agua fueron medidos con un caudalímetro de ultrasonidos portátil (Thermo Fisher Sci., Inc. Altham, MA, EEUU) a 4.0 m aguas abajo del codo de los pivots en Utah. En Aragón se utilizaron los caudalímetros disponibles en los hidrantes de las parcelas. También se recopilaron datos sobre la longitud y marca de los pivots, el área regada, el tipo de aspersores y la altura de los mismos.

Una función de distribución normal fue utilizada para estimar la distribución del agua de riego aplicada, y así analizar la influencia de la uniformidad en el uso del agua y la energía, en la producción del cultivo, y en la productividad económica (Hart, 1961; Keller y Bliesner, 1990). El análisis se realizó para la campaña de riego completa. La dosis de agua se estimó para satisfacer las necesidades hídricas netas del cultivo para un año medio, considerando diferentes porcentajes de superficie adecuadamente regada, donde la dosis de riego es igual o superior a la requerida (NRCS, 1993). Asimismo, las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) se estimaron en un 8%, según estudios previos (Kincaid et al., 1986; Ortíz et al., 2009). La eficiencia de riego (ER) se calculó según la siguiente ecuación (Burt et al., 1997), considerando la evapotranspiración del cultivo como único uso beneficioso, y nula la variación del contenido de agua de riego del suelo:

$$ER = \frac{\text{Volumen de agua de riego usada beneficiosamente}}{\text{Volumen de agua de riego} - \Delta \text{ contenido de agua de riego en suelo}} 100 \quad [2]$$

El rendimiento de los cultivos se estimó aplicando la función de producción lineal respecto al agua desarrollada por Doorenbos y Kassam (1979), y los factores de respuesta propuestos por Stewart y Hagan (1973):

$$\left[1 - \left(\frac{ET_a}{ET_c} \right) \right] \cdot k_y = 1 - \left(\frac{Y_a}{Y_p} \right) \quad [3]$$

donde Y_a es el rendimiento real del cultivo, Y_p es el rendimiento potencial, ET_a es la evapotranspiración real del cultivo, ET_c es la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas, y k_y es el factor de respuesta.

3- Resultados y Discusión

3.1- Caracterización de las zonas

La superficie regable de Aragón (410.383 ha) y Utah (478.394) es similar (NASS, 2009; MAGRAMA, 2013). La mayor parte de estos regadíos fueron desarrollados al inicio del siglo XX persiguiendo objetivos principalmente sociales. En Aragón, las nuevas zonas regables fueron promovidas por el Gobierno para repoblar y mejorar la calidad de vida en el medio rural, y asegurar la autosuficiencia de alimentos del país (Silvestre y Clar, 2010). Actualmente, la mayor parte de estas zonas están siendo modernizadas, sustituyendo el riego por superficie por el riego por aspersión o goteo. Los costes de inversión necesarios son pagados por los agricultores, siendo parcialmente subvencionados por los Gobiernos. Estos costes son similares al precio de mercado de la tierra (Lecina et al., 2010a). En Utah, los colonos mormones desarrollaron zonas regables para asegurar la subsistencia de las comunidades recientemente establecidas en el Estado en aquella época (Wrenn, 1973). Sin

embargo, en este caso las zonas regables más antiguas no se están modernizando, a pesar de sus menores productividades de riego (Lecina et al., 2011).

El tamaño de las explotaciones de regadío es mayor en Utah. Las explotaciones mayores de 100 ha ocupan el 65% de la superficie regable total (NASS, 2009). En Aragón, estas explotaciones suponen el 44% (INE, 2014a). La densidad de población en las zonas rurales de Utah (2 habitantes km⁻²) y Aragón (12 habitantes km⁻²) (USCB, 2013; INE, 2014b) influye en estos tamaños, así como en la escasez de mano de obra de ambas zonas.

De acuerdo a estos diferentes tamaños de explotación, los pivots son más usados en Utah (21% de la superficie regable) que en Aragón (9%, incluyendo máquinas laterales, aunque estas son minoritarias). Los sistemas presurizados de riego ocupan superficies similares (en torno al 43%), aunque el goteo es irrelevante en Utah (<1%), mientras que supone el 12% de la superficie regable en Aragón (NASS, 2009; MAGRAMA, 2013).

Los patrones de cultivo también influyen en estas diferencias. Aragón presenta una mayor variedad de cultivos de regadío, incluyendo extensivos, hortícolas, frutales, olivos y viñedos. La alfalfa (19%), la cebada (18%) y el maíz (16%) fueron predominantes durante el periodo 2008-2012 (MAGRAMA, 2014). La alfalfa y el maíz ocupan hasta un 75% de las superficies regadas por aspersión y dedicadas a la producción de cultivos extensivos (Lecina et al., 2010b). En Utah, la alfalfa y otros forrajes se producen en el 80% de la superficie regable. Los siguientes cultivos en importancia ocupan el 8% (maíz para ensilado) y el 5% (trigo) (NASS, 2009).

El clima es la principal razón de estas diferencias. Según las series de datos del *National Weather Service* y la Agencia Estatal de Meteorología, las áreas de estudio de Utah presentan un clima ventoso y semiárido, con características continentales, al encontrarse a más de 1.000 km del mar y a más de 900 m de altitud. Las áreas de estudio de Aragón tienen un clima semiárido, también ventoso, pero suavizado por la influencia del Mediterráneo, situado a unos 250 km, siendo sus altitudes inferiores a 450 m. Así, aunque las precipitaciones medias anuales son parecidas (375 mm en Aragón, y 413 mm en Utah), Utah presenta temperaturas medias anuales inferiores (10,0 °C vs. 14,5 °C) debido a inviernos más fríos. La evapotranspiración de referencia media anual es mayor en Utah (1.368 mm vs. 1.049 mm) (Hill, 1994; García-Vera y Martínez-Cob, 2004).

Estas características determinan diferentes tipos de agricultura. En Utah, las explotaciones están orientadas principalmente a la producción extensiva de ganado, siendo la agricultura una actividad subsidiaria. Por el contrario, en Aragón las explotaciones están dedicadas principalmente a la producción agrícola, incluyendo actividades ganaderas intensivas sólo en algunos casos. Así, la ganadería supuso un 70% del valor añadido bruto de la producción del sector agrario en su conjunto en Utah, y un 58% en Aragón durante el periodo 2008-2012 (BEA, 2014; CESA, 2009, 2011, 2013). Las subvenciones públicas supusieron una media del 26% y del 28% de este valor, respectivamente, para el mismo periodo (BEA, 2014; CESA, 2009, 2011, 2013).

Estas diferentes condiciones determinan diferentes necesidades hídricas y rendimientos de los cultivos. La comparación para la alfalfa, como principal cultivo de ambas zonas, muestra como sus necesidades hídricas netas medias fueron superiores en Utah (760 mm vs. 585 mm). Por el contrario, su rendimiento medio fue inferior (12,3 Mg ha⁻¹ vs. 15,0 Mg ha⁻¹) (Lecina et al., 2010a; Barker, 2011; MAGRAMA, 2014; USU, 2014). Un periodo vegetativo más corto limita a tres las siegas anuales de la alfalfa en Utah. En Aragón, las temperaturas más suaves (principalmente en primavera) permiten cinco.

Las fuentes de agua y sus condiciones de uso son también diferentes en las áreas de estudio de cada zona. En Beaver y Box Elder se utiliza agua subterránea mediante pozos propiedad de cada agricultor. La capa freática se encuentra de media a 130 m de profundidad. Por el contrario, el agua de riego se deriva de los ríos en Aragón. La mayor parte de las explotaciones se encuentran integradas en comunidades de regantes, las cuales son las responsables de las infraestructuras de regulación, transporte, bombeo y distribución de agua.

A pesar de estas diferencias, los precios del agua son similares en todas las áreas de estudio. El precio medio es de 0,030 € m⁻³ (0,040 US\$ m⁻³) en Aragón, y 0,029 € m⁻³ (0,039 US\$ m⁻³) en Utah, incluyendo el coste de la energía. La principal causa de esta similitud es el precio más barato de la electricidad en Utah: 0,041 € kWh⁻¹ vs. 0,100 € kWh⁻¹ (0,055 US\$ kWh⁻¹ vs. 0,135 US\$ kWh⁻¹) (EEI, 2013; REE, 2014).

Como consecuencia de todo ello, y considerando costes no relacionados con el riego y amortizaciones, la PS_n media de la alfalfa es un 21% mayor en Aragón (MAGRAMA, 2010, 2011; Trillo, 2010, Montero et al., 2013) que en Utah (Scherer, 2010; O'Brien et al., 2011; UDAF-NASS, 2013; USU, 2014). Estas diferentes productividades también se presentan en otros cultivos extensivos. A su vez, el valor absoluto de la PS_n es muy variable debido a la volatilidad de los precios. El precio medio de la alfalfa fue de 117 € Mg⁻¹ (157 US\$ Mg⁻¹) en Aragón, y de 124 € Mg⁻¹ (167 US\$ Mg⁻¹) en Utah durante los últimos cinco años, oscilando en torno a un ±20% según el UDAF-NASS (2013) y MercoLleida (comunicación personal). La PS_n fue de 471 € ha⁻¹ (631 US\$ ha⁻¹) en Aragón y de 374 € ha⁻¹ (505 US\$ ha⁻¹) en Utah, considerando los precios medios de la alfalfa, y un uso del agua y la energía correspondiente a un CU del 90% y a una superficie adecuadamente regada del 80%.

3.2- Evaluaciones de riego

3.2.1- Aragón

La Tabla 1 expone los resultados de las evaluaciones de riego obtenidos en ambas zonas. Los pivots evaluados en Aragón presentaron una superficie de riego muy variable (CV 47%), debido al irregular tamaño y forma de las parcelas. La superficie media fue de 29,3 ha. Un total de 14 pivots tenían una superficie inferior a 40 ha, lo que implica unos mayores costes de inversión y de aplicación de agua (Montero et al., 2013).

Tabla 1. Resultados de las evaluaciones de riego en pivot (*n*) realizadas en Aragón y Utah

	Aragón				Utah			
	n	Media	Máx.	Mín.	n	Media	Máx.	Mín.
Antigüedad pivots*, años	17	6	20	2	16	11	20	2
Antig. aspersores, años	17	6	20	2	12	5	12	1
Superficie regada*, ha	17	29,3	53,3	10,2	17	50,3	55,6	27,0
Presión a la entrada*, kPa	14	306	400	200	8	198	359	103
Caudal unitario*, l s ⁻¹ ha ⁻¹	17	1,36	2,00	1,10	17	1,12	1,58	0,91
Altura aspersores*, m	17	2,9	3,5	2,5	17	1,4	2,1	0,9
Velocidad del viento, m s ⁻¹	17	1,5	2,1	0,8	17	1,9	4,0	0,9
Coefic. uniformidad*, %	17	90	94	77	16	80	92	70

(*) Significativamente diferente en cada zona según la prueba de Mann-Whitney (P<0,05)

Las cartas de aspersores estaban compuestas en su totalidad, y en todos los casos, por aspersores de plato giratorio, junto con los correspondientes reguladores de presión. Este tipo de aspersores proporciona altas uniformidades (Faci et al., 2001; Sourell et al., 2003) y bajas PEA (Ortiz et al., 2009). Por ello, y a pesar de su mayor precio, el coste total de aplicación de agua (incluyendo costes de inversión) es menor en aquellos pivots que utilizan este tipo de aspersores, bajo condiciones semiáridas, y regando cultivos de altas necesidades hídricas (Montero et al., 2013).

Los aspersores estaban colocados a una altura media de 2,9 m. Esta posición es mayor que la propuesta por Kincaid et al. (1986) para minimizar las PEA (2,0 m). No obstante, la inclusión del maíz en las rotaciones de cultivo requiere dicha altura.

La presión media a la entrada de los pívots fue de 306 kPa. Este valor asegura una presión de trabajo dentro del rango requerido por los aspersores de plato giratorio a lo largo del pívot (100-200 kPa), considerando las alturas y diámetros usuales de la tubería. Únicamente en dos casos, esta presión a la entrada del pívot no era suficiente como para asegurar el correcto funcionamiento de los aspersores situados en el extremo libre del pívot.

El caudal unitario medio fue de $1,36 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Un pívot presentó un caudal unitario inferior (-7%) a la demanda punta de agua en esta zona ($1,15 \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) (García-Vera y Martínez-Cob, 2004).

Las marcas de los pívots fueron dos: Urapivot (71%) y Valley (29%). La antigüedad media de los equipos era de 6 años. La mayoría de ellos (15) fueron instalados en procesos de transformación o modernización realizados en los últimos siete años. La antigüedad de las cartas de aspersores era la misma. Únicamente unos pocos aspersores habían sido reemplazados a causa de roturas o evidente mal funcionamiento.

El CU medio fue del 90%, alcanzando así el potencial de uniformidad de este tipo de sistemas de riego. CU mayores del 87,5 % fueron considerados dentro del rango de uniformidad potencial, teniendo en cuenta la precisión de estos procedimientos de evaluación de riego en campo (Merriam y Keller, 1978). Cinco pívots presentaron un CU inferior. Los equipos más antiguos, y aquellos que presentaron las menores presiones a la entrada (en torno a 200 kPa), están incluidos en este grupo. No se observó en ninguna evaluación escorrentía superficial, o signos de ella, a pesar de que algunos pívots se encontraban en zonas con topografía irregular. En dichos casos, los agricultores realizaban un laboreo que dejaba la superficie del terreno dividida en pequeñas cubetas de tierra para evitar así la posible escorrentía.

Estas uniformidades son notablemente superiores que las obtenidas por Dechmi et al. (2003a) en condiciones similares de viento, en una comunidad de regantes cercana (75% de media). Dos diferencias principales fueron encontradas entre dicha comunidad y las áreas de estudio de este trabajo: 1) Esta comunidad fue transformada en los años 80 por el Gobierno como un regadío social, mientras que las áreas de estudio fueron transformadas o modernizadas mediante inversión privada, parcialmente subvencionada con fondos públicos; 2) Los pívots instalados en los años 80 presentaban una tecnología y un diseño obsoletos respecto a los equipos actuales (Dechmi et al., 2003b).

3.2.2- Utah

La superficie de riego era significativamente más grande y uniforme en los pívots evaluados en Utah. Un total de 16 pívots tenían superficies entre 50,8 y 55,6 ha. Estas superficies suponen menores costes de inversión y de operación (Burt et al., 1999). La transformación en tierra agrícola de regadío directamente a través de pívots facilitó la adopción de longitudes de 400 m.

La configuración de las cartas de aspersores era también diferente. Los aspersores de plato giratorio eran utilizados en el 35% de los pívots, y los de plato fijo en otro 35%. El resto de pívots combinaban ambos tipos de aspersores, situando en los dos o tres primeros tramos desde el extremo fijo del pívot los aspersores de plato giratorio. El uso de aspersores de plato fijo buscaría reducir las necesidades de presión y los costes de inversión, debido a la menor presión mínima que requieren ciertos modelos de aspersores de este tipo, y a su menor precio. La altura media a la que se encontraban los aspersores (1,4 m) se encontraba dentro del rango recomendado para minimizar las PEA (Kincaid et al., 1986).

La presión media a la entrada del pívot era de 198 kPa, siendo significativamente menor que en Aragón, y que en otras zonas de EEUU (Henggeler y Vories, 2009). En este caso, la presión no es proporcionada por estaciones de bombeo y redes de distribución colectivas, sino por bombeos particulares operados por los propios agricultores. Por tanto, las medidas de presión a la entrada del pívot resultan necesarias para una adecuada gestión del sistema. Sin embargo, únicamente se encontraron manómetros disponibles en ocho de los pívots evaluados en Utah. Cinco de estos pívots presentaron presiones

inferiores a 190 kPa (utilizaban aspersores de plato giratorio) o a 140 kPa (utilizaban aspersores de plato fijo), por lo que, posiblemente, la presión mínima de trabajo no fuese alcanzada en los aspersores situados en el extremo libre de estos pivots.

El caudal unitario medio también fue significativamente inferior ($1,12 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$), a pesar de las mayores necesidades hídricas anuales de la alfalfa en Utah. Esta diferencia podría ser debida a la inclusión del maíz en la rotación de cultivos en Aragón. El maíz presenta una mayor demanda punta de agua, y su rendimiento es más sensible al estrés hídrico. Tres pivots presentaron caudales inferiores (5-10%) a la demanda punta estimada para la alfalfa en las áreas de estudio de Utah ($1,00 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) (Hill, 1994).

Los pivots eran significativamente más antiguos en Utah. Su antigüedad media era de 11 años, oscilando entre 2 y 20 años. Sin embargo, la antigüedad media de las cartas de aspersores era de 6 años. Según las encuestas realizadas, las cartas de aspersores son completamente sustituidas tras 10-14 años desde su instalación. Las marcas de los pivots eran Reinke (52%), Valley (24%) y Zimmatic (24%).

Finalmente, la uniformidad de riego fue significativamente inferior a la obtenida en Aragón. La CU media fue del 80%. La mayor parte de los pivots (10) presentó CU entre 77,5% y 87,5%. El resto, se repartió equitativamente a ambos lados de este rango. Un corte de energía eléctrica durante la evaluación, impidió la determinación del CU en uno de los pivots. Como en Aragón, no se observó escorrentía superficial en ninguna evaluación, siendo las superficies regables predominantemente llanas.

Factores de diseño, operación y mantenimiento podrían influir en estos CU inferiores al valor potencial del 90%. Una baja presión de trabajo en parte de los aspersores podría ser el principal factor operativo. De hecho, el CU fue menor del 80% en aquellos pivots que presentaron presiones a la entrada inferiores a 200 kPa.

El mantenimiento de las cartas de aspersores puede ser también un factor relevante. Según Louie y Selker (2000), el cambio completo de las cartas de aspersores en un plazo de tiempo razonable no influye en la uniformidad, sino en la dosis de agua aplicada. Sin embargo, la sustitución de aquellos aspersores que se estropean antes de finalizar su vida útil teórica, puede suponer una progresiva reducción de la uniformidad, si no se respetan los modelos y diámetros de boquilla originales.

Respecto a los factores de diseño, la determinación del espaciamiento de los aspersores, y de sus diámetros de boquilla, está estandarizado (Allen, 1992; Valin et al., 2012; entre otros). Por este motivo, no es probable que implique una limitación para alcanzar altos CU. La elección de aspersores de plato fijo en lugar de giratorio puede reducir los costes de inversión y la presión de bombeo. Sin embargo, implica mayores costes de aplicación de agua como consecuencia de menores CU (para presiones de trabajo inferiores a 100 kPa) y mayores PEA en zonas semiáridas y ventosas, regando cultivos de altas necesidades hídricas (Kincaid et al., 1986; Ortíz et al., 2009; Montero et al., 2013).

La determinación de la influencia cuantitativa de estos y/o otros factores en el CU de los pivots evaluados requeriría un detallado análisis, no incluido en el ámbito de este trabajo. Sin embargo, el bajo CU de los pivots evaluados en Utah sugiere que los agricultores podrían estar tratando de minimizar los costes de inversión, operación y mantenimiento de sus equipos aunque el CU disminuya por este motivo. La lógica detrás de este comportamiento podría estar basada en la menor PS_n de la alfalfa en Utah. Pero, ¿es esta lógica correcta desde una perspectiva económica?

3.3- Influencia de la uniformidad de riego en la productividad

La PS_n fue estimada para la alfalfa considerando un rango de CU del 80% (ER 73%) al 90% (ER 82%), y un rango de superficie adecuadamente regada del 65% al 95%. Los resultados mostraron que la PS_n máxima se obtiene para superficies adecuadamente regadas entre el 75% y el 85% en ambas zonas. Las diferencias dentro de este rango son despreciables (<1%) para todos los valores de CU.

Las PS_n indicadas en el apartado 3.1 fueron consideradas como referencia. De acuerdo a la función normal de distribución (Figura 2), una CU del 80% implica un incremento del 12% en el uso del agua y la energía para una superficie adecuadamente regada del 80%. Además, este menor CU supone una reducción del rendimiento del cultivo del 2,0% respecto al rendimiento que se obtendría con un CU del 90%. Esto es debido a la menor dosis de agua que se aplicaría en el 20% de la superficie menos regada. Como consecuencia de todo ello, la PS_n disminuye en 64 € ha^{-1} ($86 \text{ US\$ ha}^{-1}$) en Aragón, y en 66 € ha^{-1} ($89 \text{ US\$ ha}^{-1}$) en Utah, para CU del 80%. Estas reducciones suponen un recorte del -14% y -18%, respectivamente, de la PS_n obtenida para un CU del 90% (Figura 3). Una variabilidad del precio de la alfalfa del $\pm 20\%$, supondría una variación de la reducción de la PS_n de $\pm 7 \text{ € ha}^{-1}$ ($9 \text{ US\$ ha}^{-1}$) en Aragón, y de $\pm 6 \text{ € ha}^{-1}$ ($8 \text{ US\$ ha}^{-1}$) en Utah. Este impacto estimado de la CU en la PS_n de la alfalfa podría ser menor como consecuencia de la mayor uniformidad del contenido de agua del suelo respecto a la uniformidad de la aplicación de agua por los aspersores (Montazar y Sadeghi, 2008).

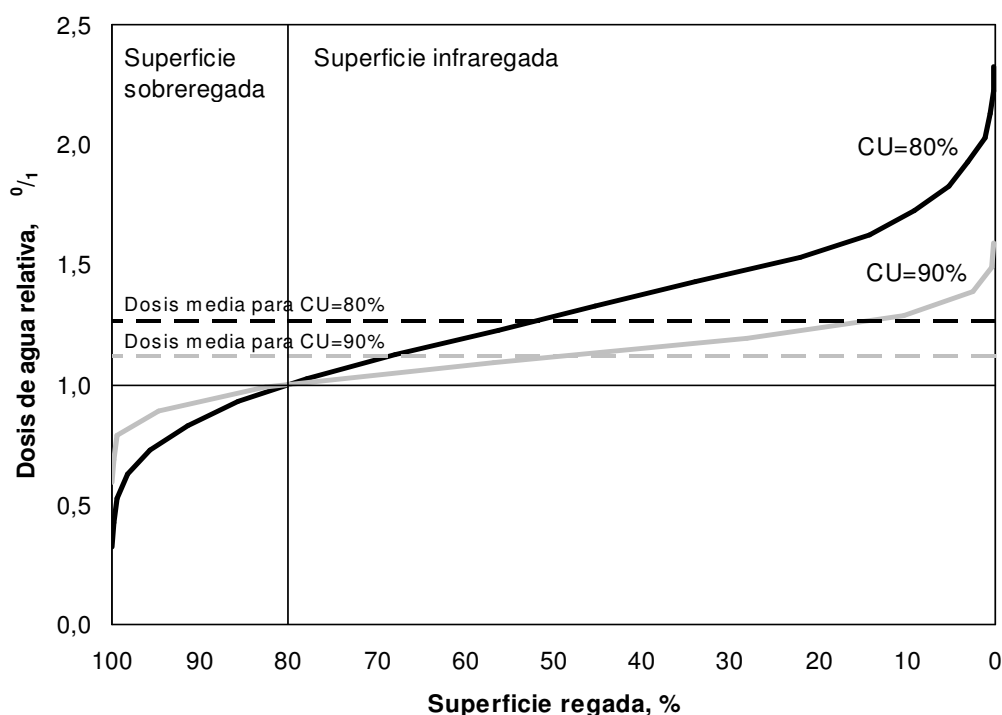


Figura 2. Función normal de distribución de agua de riego (dosis relativa aplicada al suelo e infiltrada) para coeficientes de uniformidad (CU) del 80% y 90%

Según Barker (2011), la alfalfa podría estar infraregada en algunos pívots evaluados en Utah. Para tener en cuenta este caso, la reducción de la PS_n se estimó considerando una dosis de riego calculada para un CU del 90%, pero aplicada con un CU del 80%. En estas condiciones, la reducción de la PS_n sería más alta, ya que la reducción de costes que implicaría el menor uso de agua y energía, sería menor que la reducción de ingresos provocada por la mayor reducción del rendimiento del cultivo (3% adicional).

Actuar sobre algunas de las causas antes indicadas al objeto de incrementar el CU en Utah sería rentable. El coste anual de aplicación del agua debido al incremento en 50 kPa de la presión a la entrada del pívot se incrementaría en 9 € ha^{-1} ($13 \text{ US\$ ha}^{-1}$) para la configuración media de los pívots en Utah. La sustitución completa de los aspersores implicaría un coste de inversión anual en torno a los 5 € ha^{-1} ($7 \text{ US\$ ha}^{-1}$), considerando un 8% de interés y 10 años de amortización (Henggeler y Vories, 2009). Finalmente, el coste de una evaluación de riego y un análisis detallado del estado de la carta de aspersores se estima en 5 € ha^{-1} ($7 \text{ US\$ ha}^{-1}$). Estos costes son menores que la reducción de la PS_n debida a la diferencia entre el CU actual y potencial.

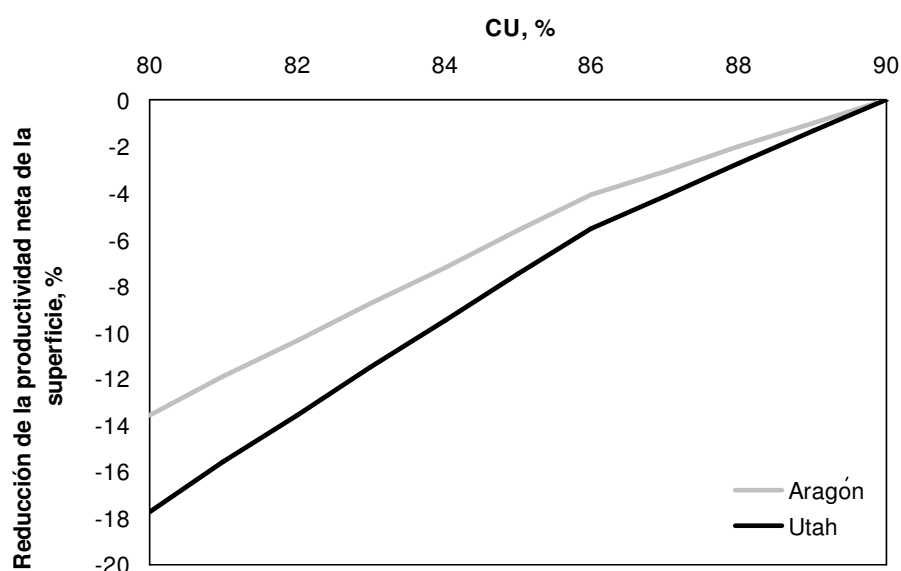


Figura 3. Reducción de la productividad neta de la superficie de un cultivo de alfalfa en función del coeficiente de uniformidad de riego (CU) en Aragón y Utah (máxima productividad neta de la superficie considerada de forma práctica para un CU del 90%)

Estos resultados sugieren que las decisiones de inversión, operación y mantenimiento de los agricultores de Utah pueden estar siendo tomadas en un contexto de incertidumbre, como consecuencia de una falta de conocimiento preciso de la relación entre el CU y la PS_n . En este contexto, la percepción de los agricultores de la realidad (relación CU- PS_n) puede estar sesgada por sus condiciones socio-económicas y su actitud frente al riesgo (English et al., 2002). Así, la menor PS_n , y el rol secundario de la producción agraria podrían inducir a prestar más atención a los costes en Utah. Por el contrario, los agricultores de las áreas de estudio de Aragón podrían estar dando más énfasis a los aspectos relacionados con los ingresos. Para comprobar esta hipótesis serían necesarios estudios socio-económicos específicos en ambas zonas.

Las consecuencias de estos sesgos podrían extenderse a la programación de riego. El infrariego de la alfalfa indicado por Barker (2011) en Utah, reforzaría esta hipótesis. Así, la reducción de la PS_n podría ser mayor si los eventos de riego no se ajustan a las necesidades hídricas del cultivo, y/o el momento de riego se selecciona sin tener en cuenta las condiciones meteorológicas más adecuadas. Una cuantificación completa de la reducción de la PS_n (considerando la programación de riego), y una comprensión adecuada de sus causas, permitiría determinar aquellos servicios y tecnologías económicamente más efectivas para evitar sesgos, y la pérdida de beneficios que estos pueden suponer.

4- Conclusiones

Las uniformidades de riego con sistemas pívot son diferentes bajo los diferentes contextos socio-económicos de la agricultura de Aragón y Utah. El CU medio fue del 90% en Aragón y del 80% en Utah. Las decisiones de los agricultores sobre la inversión, operación y mantenimiento de sus pívots pueden estar sesgadas por una percepción errónea del impacto de estas decisiones en la uniformidad del riego y la PS_n .

A pesar del menor potencial de producción agrícola, el bajo CU implica una significativa pérdida económica a los agricultores de Utah. La diferencia entre el CU actual y potencial supone una reducción de la PS_n del -18% (66 € ha⁻¹, 89 US\$ ha⁻¹).

Se requieren estudios multidisciplinares para entender y evitar la reducción de la PS_n de una forma efectiva. Para este fin serían necesarios análisis socio-económicos adicionales, así como la evaluación de las programaciones de riego. De este tipo de estudios pueden surgir oportunidades de desarrollo de nuevas tecnologías y servicios, cuyo beneficio económico sería una parte de la reducción de la PS_n que lograsen evitar.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo prestado en la realización de este trabajo al Dr. G. P. Merkle (Utah State University), a M. Nelson (Utah State University Cooperative Extension), y a las compañías Ager ingenieros S.L. y MercoLleida. Se agradece también la colaboración de todos los agricultores que permitieron la evaluación de sus pivots, así como de los técnicos y estudiantes que participaron en los trabajos de evaluación en campo. El contrato postdoctoral de S. Lecina en Utah fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. El contrato de investigación de S. Lecina en España fue financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias

- Allen, R. G., 1992. Catch-3D sprinkler pattern analysis software: user's manual. Department of Biological and Irrigation Engineering. Utah State University. Logan, UT, USA.
- Almasraf, S., Jury, J., Miller, S., 2011. Field evaluation of center pivot sprinkler irrigation systems in Michigan. Final Draft. Department of Biosystems and Agricultural Engineering. Michigan State University. East Lansing, MI, USA. 36 pp.
- ASABE, 2007. Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. ASABE Standard S436.1. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, MI, USA.
- Barker, J. B., 2011. Estimation of field alfalfa evapotranspiration in a windy arid environment. School of Graduate Studies. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 324. Utah State University. Logan, UT, USA. 160 pp.
- BEA, 2014. Farm income and expenses. Bureau of Economic Analysis. US Department of Commerce. Disponible en <https://www.bea.gov/iTable/iTable.cfm?ReqID=70&step=1#reqid=70&step=1&isuri=1> [Visto: Marzo 2014].
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E., 1997. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *J. Irrig. Drainage Eng-ASCE* 123, 423-442.
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Bliesner, R., Merriam, J. L., Hardy, L., 1999. Selection of Irrigation Methods for Agriculture. American Society of Civil Engineers. Reston, VA, USA. 129 pp.
- CESA. 2009. Informe sobre la situación económica y social de Aragón. 2008. Edición resumida. Consejo Económico y Social de Aragón. Zaragoza, Spain. 245 pp.
- CESA. 2011. Informe sobre la situación económica y social de Aragón. 2010. Edición resumida. Consejo Económico y Social de Aragón. Zaragoza, Spain. 223 pp.
- CESA. 2013. Informe sobre la situación económica y social de Aragón. 2012. Panorama económico. Consejo Económico y Social de Aragón. Zaragoza, Spain. 571 pp.
- Cuenca, R. H., 1989. Irrigation system design: an engineering approach. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ, USA. 522 pp.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., Bercero, A., 2003a. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain II. Irrigation evaluation, simulation and scheduling. *Agric. Water Manage.* 61, 93-109.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., 2003b. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain I. Characterisation and water use assessment. *Agric. Water Manage.* 61, 75-92.
- Doorenbos, J. Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 212 pp.
- ECB. 2014. Bilateral exchange rates. Statistical Data Warehouse. European Central Bank. Disponible en <http://sdw.ecb.europa.eu/browse.do?node=2018794> [Visto: Marzo 2014].

- EEl, 2013. Typical bills and average rates report. Winter 2013. Edison Electric Institute. Washington DC, USA.
- Faci, J.M., Bercero, A., 1990. Desarrollo de coeficientes de uniformidad ponderados con la superficie en evaluaciones de riego de ramales autotransportados giratorios (pivotes). *Invest. Agric.: Prod. Prot. Veg.* 5 (1), 103–116.
- Faci, J.M., Bercero, A., 1991. Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. *Prod. Prot. Veg.*, 97-117.
- Faci, J. M., Salvador, R., Playán, E., Sourell, H., 2001. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. *J. Irrig. Drain. Eng.-ASCE* 127, 224-233.
- García-Vera, M.A., Martínez-Cob, A., 2004. Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la cuenca del Ebro. Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Zaragoza, Spain. 111 pp+Annexes.
- Hart, W. E., 1961. Overhead irrigation pattern parameters. *Agricultural Engineering* 42(7), 354-355.
- Henggeler, J. C., Vories, E. D., 2009. Evaluating center pivot distribution uniformity from catch can tests. 2009 ASABE Annual International Meeting. Paper number 096044. American Society of Agricultural and Biological Engineers. June 21- 24. Reno, NV, USA.
- Heermann, D.F., Hein, P.R., 1968. Performance characteristics of self-propped centre pivot sprinkler irrigation system. *Trans. ASAE* 11(1), 11-15.
- Hill, R. W. 1994. Consumptive use of irrigated crops in Utah. Research Report 145. Utah Agricultural Experiment Station. Utah State University. Logan, UT, USA. 361 pp.
- INE, 2014a. Censo Agrario 2009. Instituto Nacional de Estadística. Disponible en <http://www.ine.es/CA/Inicio.do> [Visto: Marzo 2014].
- INE, 2014b. Cifras de población y censos demográficos. Instituto Nacional de Estadística. Disponible en http://www.ine.es/inebmenu/mnu_cifraspob.htm [Visto: Marzo 2014].
- Keller, J., Bliesner, R.D., 1990. *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold. New York, NY, USA. 652 pp.
- Kincaid, D.C., Nabil, M., Busch, J.R., 1986. Spray losses und uniformity with low pressure center pivot. *American Society of Agricultural Engineers (ASAE) (Paper No. 86-2091)*.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playan, E., Aragues, R., 2010a. Irrigation modernization and water conservation in Spain: The case of Riegos del Alto Aragon. *Agric. Water Manage.* 97, 1663-1675.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playan, E., Aragues, R., 2010b. Irrigation Modernization in Spain: Effects on Water Quantity and Quality-A Conceptual Approach. *International Journal of Water Resources Development* 26, 265-282.
- Lecina, S., Neale, C.M.U., Merkley, G.P., Dos Santos, C.A.C., 2011. Irrigation evaluation based on performance analysis and water accounting at the Bear River Irrigation Project (U.S.A.). *Agric. Water Manage.* 98, 1349-1363.
- Leeuwis, C., Van Den Ban, A., 2004. *Communication for rural innovation: rethinking agricultural extension*. Third Edition. Wiley-Blackwell. Oxford, UK. 428 pp.
- Louie, M. J.; Selker, J. S., 2000. Sprinkler head maintenance effects on water application maintenance. *J. Irrig. Drain. Eng.-ASCE* 126, 142-148.
- Luquet, D., Vidal, A., Smith, M., Dauzat, J., 2005. 'More crop per drop': how to make it acceptable for farmers? *Agric. Water Manage.* 76, 108-119.
- MAGRAMA, 2011. Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Aragón en 2010. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, Spain. 77 pp.
- MAGRAMA, 2012. Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Aragón en 2011. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, Spain. 75 pp.
- MAGRAMA, 2013. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Resultados nacionales y autonómicos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, Spain. 44 pp.

- MAGRAMA. 2014. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Encuesta de marco de área de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/> [Visto: Marzo 2014].
- Merriam, J.L. Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Utah State University. Logan, UT, USA. 271 pp.
- Montazar, A., Sadeghi, M., 2008. Effects of applied water and sprinkler irrigation uniformity on alfalfa growth and hay yield. *Agric. Water Manage.* 95, 1279-1287.
- Montero, J., Martínez, A., Valiente, M., Moreno, M.A., Tarjuelo, J.M., 2013. Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. *Irrig. Sci.* 31, 507-521.
- NASS, 2009. Farm and ranch irrigation survey (2008). 2007 Census of Agriculture. Volume 3. Special Studies. Part 1. National Agricultural Statistics Service. US Department of Agriculture. Washington DC, USA. 268 pp.
- UDAF-NASS, 2013. Utah agricultural statistics and Utah Department of Agriculture and Food 2013 Annual Report. Utah Agricultural Statistics-Utah Department of Agriculture and Food. National Agricultural Statistics Service-US Department of Agriculture. Salt Lake City, UT, USA. 93 pp.
- NRCS, 1993. National engineering handbook. Part 623: Irrigation. Chapter 2: Irrigation water requirements. Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. Washington DC, U.S.A. 283 pp.
- O'Brien, D. M., Dumler, T. J., Rogers, D. H., 2011. Irrigation capital requirements and energy costs. Kansas State University Agricultural Experiment Station and cooperative Extension Service. Farm Management Guide MF-836.
- Ortiz, J.N., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A., 2009. Characterisation of evaporation and drift losses with centre pivots. *Agric. Water Manage.* 96, 1541-1546.
- REE, 2014. Término de facturación de energía activa del PVPC. Red Eléctrica de España. Disponible en <http://www.esios.ree.es/web-publica/> [Visto: Marzo 2014].
- Rogers, D. H., Alam, M., Shaw, L. K., Clark, G. A., 2009. Impact of collector size and spacing on center pivot uniformity evaluations. 2009 ASABE Annual International Meeting. Paper number 096522. American Society of Agricultural and Biological Engineers. June 21- 24. Reno, NV, USA.
- Scherer, T. 2010. Selecting a sprinkler irrigation system. North Dakota State University Extension Service. Bulletin AE-91.
- Silvestre, J., Clar, E., 2010. The demographic impact of irrigation projects: a comparison of two case studies of the Ebro basin, Spain, 1900-2001. *Journal of Historical Geography* 36, 315-326.
- Sourell, H., Faci, J.M., Playán, E., 2003. Performance of rotating spray plate sprinklers in indoor experiments. *J. Irrig. Drain. Eng.-ASCE* 129, 376-380.
- Stewart, J.I., Hagan, R.M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. *J. Irrig. Drain. Div.-ASCE* 99, 421-439.
- Tanji, K.K., Keyes, C.G., 2002. Water quality aspects of irrigation and drainage: Past history and future challenges for civil engineers. *J. Irrig. Drainage Eng.-ASCE* 128, 332-340.
- Tarjuelo, J.M., Montero, J., Honrubia, F.T., Ortiz, J.J., Ortega, J.F., 1999. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. *Agric. Water Manage.* 40, 315-331.
- Trillo, C., 2010. Amortizar la modernización, un problema pendiente de resolución. *Inter Cuencas* 23, 13.
- USCB. 2013. United States: 2010. Summary population and housing characteristics. 2010 Census of population and housing. U.S. Census Bureau. US Department of Commerce. Washington DC, USA. 1,036 pp.
- USU, 2014. Enterprise budgets. Crops. Utah State University Cooperative Extension. Disponible en <https://apecextension.usu.edu/hm/agribusiness/budgets/crops> [Visto: Marzo 2014].

- Valin, M.I., Cameira, M.R., Teodoro, P.R., Pereira, L.S., 2012. DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation. *Comput. Electron. Agric.* 87, 159-170.
- Venot, J. P., Zwarteveen, M., Kuper, M., Boesveld, H., Bossenbroek, L., Van Der Kooij, S., Wanvoeke, J., Benouniche, M., Errahj, M., De Fraiture, C., Verma, S., 2014. Beyond the promises of technology: a review of the discourses and actors who make drip irrigation. *Irrig. and Drain.* In press. DOI: 10.1002/ird.1839.
- Wrenn, R. S., 1973. A history of water resources development in the Bear River basin of Utah, Idaho, and Wyoming. School of Graduate Studies. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 324. Utah State University. Logan, UT, USA. 127 pp.